



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

En analyse af lavfrekvent støj fra store vindmøller

Pedersen, Christian Sejer; Møller, Henrik; Pedersen, Steffen

Published in:
BULLER I BLÅSVÅDER

Publication date:
2011

Document Version
Accepteret manuscript, peer-review version

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Pedersen, C. S., Møller, H., & Pedersen, S. (2011). En analyse af lavfrekvent støj fra store vindmøller. I F. Mossberg (red.), *BULLER I BLÅSVÅDER: Lund Symposium, 25. marts 2011* (s. 47-68). Lunds Universitet. Skrifter från Ljudmiljöcentrum vid Lunds universitet Nr. 11

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

EN ANALYSE AF LAVFREKVENT STØJ FRA STORE VINDMØLLER - LUND SYMPOSIUM 2011^a

Af Christian Sejer Pedersen, Henrik Møller, Steffen Pedersen

Akustik, Aalborg Universitet, Fredrik Bajers Vej 7, B5, 9220 Aalborg Ø, Danmark
cp@acoustics.aau.dk

RESUMÉ

I undersøgelsen analyseres målinger af støjen fra 65 vindmøller, 25 store (2,3-3,6 MW) og 40 små (op til 2 MW).

Resultaterne viser, at store vindmøller udsender relativt mere lavfrekvent støj^b end små vindmøller. Efterhånden som støjen bevæger sig væk fra møllen, bliver det lavfrekvente indhold endnu mere udtalt, fordi luftens absorption reducerer de høje frekvenser mere end de lave.

Ser man på det A-vægtede lydtryk udendørs i relevante naboafstande, udgør de lave frekvenser en væsentlig del af støjen. Der er derfor ingen tvivl om, at den lavfrekvente del af støjspektret har betydning for naboernes oplevelse af støjgener fra store vindmøller.

Den lavfrekvente støj kan også genere indendørs, naturligvis afhængigt af lydisolationen. Hvis det udendørs lydtryk for den totale støj ligger i nærheden af det maksimalt tilladelige i Danmark^c, er der risiko for, at en betragtelig del af naboerne vil være generede af lavfrekvent støj, selv indendørs.

Forskellen i lavfrekvent støj fra små til store møller kan udtrykkes som en forskydning nedad i frekvens af det relative frekvensspektrum på omkring 1/3 oktav. Et yderligere skift af lignende størrelse må forventes for vindmøller i 10 MW størrelsen med dertil svarende forøgede gener fra lavfrekvent støj.

Vindmøllerne udsender også infralyd^d, men når man tager menneskets følsomhed overfor disse frekvenser i betragtning, er der tale om meget lave niveauer. Selv tæt på møllerne er lydtrykket langt under den normale høretærskel. Infralyd betragtes derfor ikke som et problem for møller af konstruktion og størrelse som de undersøgte møller.

Under visse atmosfæriske betingelser kan støjen fra vindmøller være mere generende og – især den lavfrekvente del – udbrede sig meget længere end normalt antaget. Det er nødvendigt med mere viden om sådanne fænomener og deres forekomst.

^a Hele rapporten kan downloades fra følgende hjemmeside:

http://www.es.aau.dk/sections/acoustics/press/opdateret_rapport_om_stoej_fra_vindmoeller/

^b Støj i frekvensområdet 20-200 Hz

^c Et A-vægtet lydtrykniveau på 44 dB

^d Lyd med frekvenser under 20 Hz

1 INTRODUKTION

På symposiet "BULLER I BLÅSVÄDER" den 25. marts 2011 i Lund, Sverige, blev der præsenteret overordnede resultater fra en undersøgelse, som er publiceret i sin fulde længde i rapporten "Lavfrekvent støj fra store vindmøller - opdateret 2011"^e

Dette er en kort gennemgang af de præsenterede data. Statistiske analyser, yderligere analyser og detaljer findes i rapporten. Rapporten indeholder desuden en gennemgang af tidligere undersøgelser.

1.1 Oversigt over undersøgelsen

I projektet blev støjen fra fire store vindmøller målt, støjdata for 61 andre små og store møller blev indsamlet, og den lavfrekvente lydisolationen blev målt for ti rum i normale beboelseshuse. Disse data bruges til at undersøge forbindelsen mellem udsendt lydeffekt og møllestørrelse. Kildespektrerne analyseres og diskuteres, og især den hypotese, at spektret bevæger sig mod lavere frekvenser for stigende møllestørrelse, undersøges. Udendørs og indendørs spektrale niveauer i relevante naboafstande analyseres og diskuteres. Målingerne og dataindsamlingen blev foretaget af Delta, og flere detaljer kan findes i de originale rapporter [1, 2, 3, 4, 5].

2 METODER

2.1 Vindmøller

Der indgik i alt 65 vindmøller i projektet, 25 "store" med nominel effekt på mere end 2 MW og 40 "små" med nominel effekt på op til 2 MW. Alle møller var tre-bladede med rotoren placeret på vindsiden af tårnet ("forløbere").

2.2 Udsendt lydeffekt

Den lydeffekt, som udsendes fra vindmøllerne, blev målt i overensstemmelse med standarden IEC 61400-11 [6]. Princippet i denne standard er at måle lyden på en reflekterende plade anbragt på jorden nedenfor vindmøllen i en vandret afstand svarende til cirka møllens totale højde. Det målte lydtrykniveau konverteres til lydeffektniveau for en imaginær punktkilde i rotorens centrum, som ville udsende den samme lyd i den retning, hvor målingen er foretaget. Resultatet betegnes det *apparente lydeffektniveau*, hvor 'apparente' understreger, at det ikke er den sande lydeffekt, men den effekt som 'ses' i den målte retning.

Det apparente lydeffektniveau blev bestemt for 1/3-oktavbånd og som et samlet A-vægtet niveau, L_{WA} . Desuden blev et særligt lavfrekvensmål, L_{WALF} , det apparente A-vægtede lydeffektniveau for 1/3-oktavbåndene 10-160 Hz beregnet. Det A-vægtede lydtrykniveau for dette frekvensområde, L_{pALF} , benyttes af de danske retningslinjer for lavfrekvent støj.

Data blev fremskaffet for alle møller i læretningen, benævnt *referenceretningen*, ved en vindhastighed på 8 m/s (10 m over jorden).

^e Hele rapporten kan downloades fra følgende hjemmeside:

http://www.es.aau.dk/sections/acoustics/press/opdateret_rapport_om_stoej_fra_vindmoeller/

2.3 Udendørs lydtrykniveau ved naboer

Fritfelt-lydtrykniveau, L_p , hos naboer i læretningen blev beregnet efter metoden i ISO 9613-2 [7], bortset fra at der blev anvendt 1/3-oktavbånd i stedet for oktavbånd.

Retningen til naboer er mere vandret end den retning, hvor det apparente lydeffektniveau blev målt, men i mangel af mere præcise data, blev lydeffektniveauet plus retningsfaktoren, $L_W + D_C$, erstattet af det apparente lydeffektniveau, L_{WA} , for referenceretningen. Dæmpningen som følge af atmosfærisk absorption, A_{atm} , blev beregnet ved hjælp af data fra ISO 9613-1 [8] for 10° C og en relativ luftfugtighed på 80 %. 'Dæmpningen' på grund af jordens indvirkning, L_{gr} , blev sat til -1,5 dB, hvilket betyder, at der lægges 1,5 dB til den direkte lyd fra møllen. De to resterende led i ISO 9613-2 (dæmpninger på grund af en eventuel barriere A_{bar} og diverse A_{misc}) blev sat til nul.

Hvis den skrå afstand fra rotorcenter til observationspunktet betegnes d , og dæmningskonstanten er α , bliver

$$L_p = L_{WA} - 20 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{1 \text{ m}} \right) - 11 \text{ dB} - \alpha \cdot d + 1.5 \text{ dB} \quad (1)$$

Denne beregning svarer til den, der anvendes i den danske regulering af støj fra vindmøller [9]. Bemærk at den svenske beregningsmetode er anderledes, og resultaterne kan derfor ikke direkte sammenlignes med svenske grænser.

2.4 Lydisolation

For at gøre det muligt at beregne den lavfrekvente støj indendørs, blev lydisolationen ved lave frekvenser målt for ti rum, to rum i hvert af fem normale beboelseshuse [4].

Lydisolationen blev målt for 1/3-oktavbåndene i frekvensområdet 8-200 Hz, og den blev beregnet som forskellen mellem udendørs fritfelt-lydtrykniveau og indendørs lydtrykniveau.

2.5 Indendørs lydtrykniveau ved naboer

Indendørs lydtrykniveauer blev fundet ved at trække lydisolationen fra det udendørs fritfelt-lydtrykniveau, begge givet i 1/3-oktavbånd.

2.6 Statistiske metoder

Forskelle er testet med Student's t-tests, og den højeste p-værdi, der regnes som signifikant og rapporteres, er 0,05.

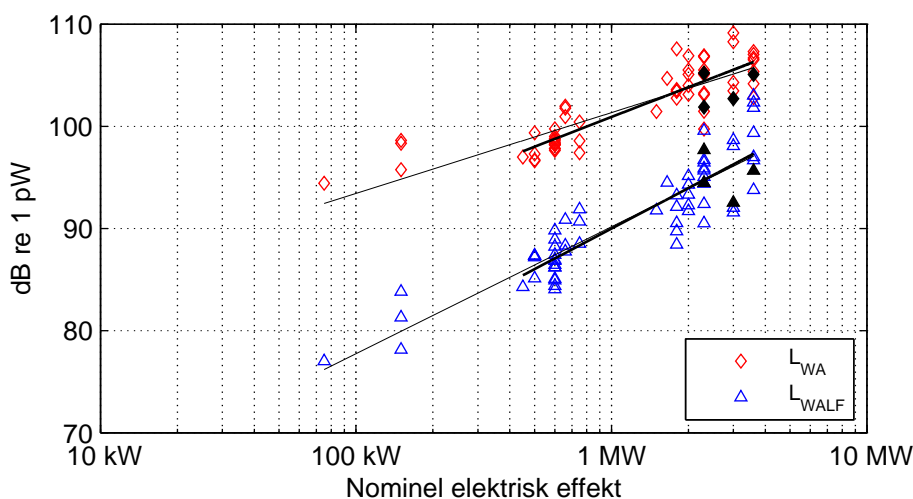
3 RESULTATER OG DISKUSSIONER

For tre af vindmøllerne, en på 1650 kW og to på 2,3 MW (Mølle 24 og 25) findes der ikke data for 1/3-oktavbånd, hvorfor kun L_{WA} og L_{WALF} rapporteres. For de små møller er data ved og under 50 Hz domineret eller påvirket af baggrundsstøj (vindstøj) [3], hvorfor disse data er udeladt i de statistiske analyser og vist med stiplede linje i alle figurer. En ekstra vindhætte til mikrofonen blev udviklet og benyttet ved de store møller [1]. Der er enkelte uoverensstemmelser mellem de data, som Delta har angivet i de forskellige rapporter, tabeller og figurer.

3.1 Udsendt lydeffekt

3.1.1 L_{WA} og L_{WALF}

Figur 1 viser L_{WA} og L_{WALF} for alle møllerne som funktion af møllestørrelse.



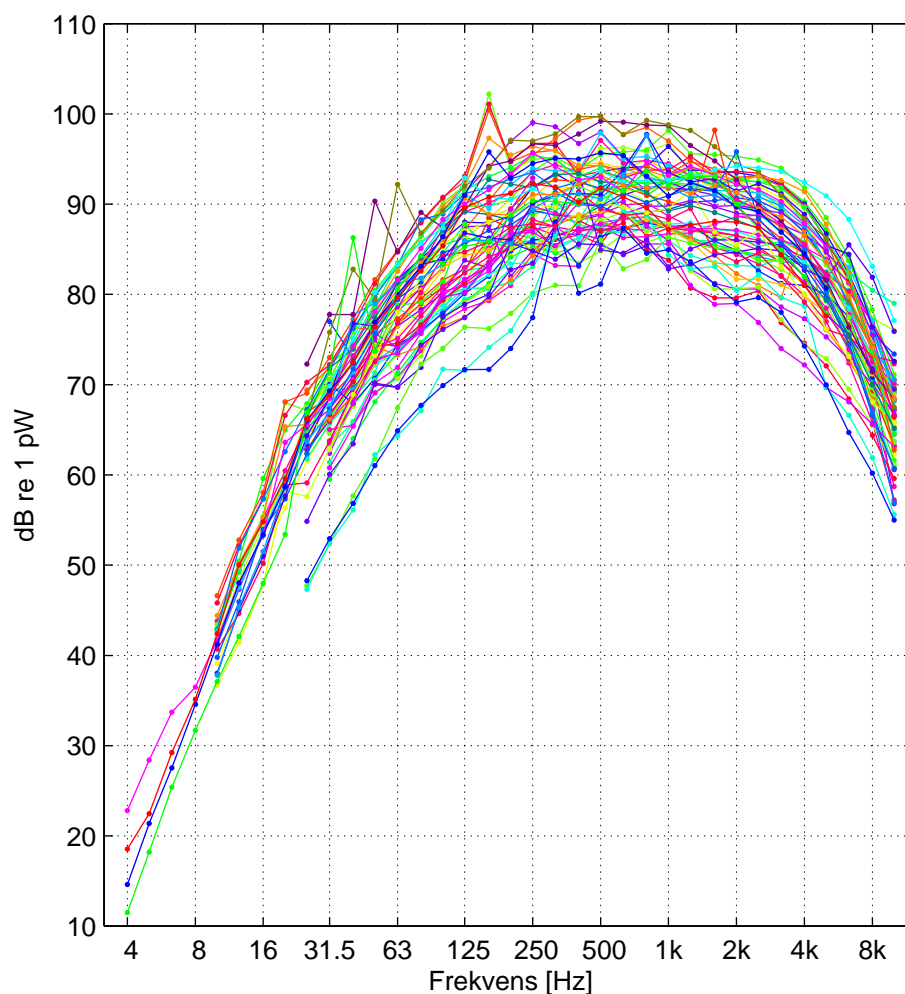
Figur 1. Lydeffektniveauer (L_{WA} and L_{WALF}) som funktion af møllestørrelse for 65 møller. Referenceretning, vindhastighed 8 m/s. Regressionslinjer: Alle møller medregnet (tynde linjer), fire møller under 450 kW ikke medregnet (tykke linjer). Sorte symboler gælder prototypemøllerne, Mølle 1-4.

Det ses – ikke overraskende – at både L_{WA} og L_{WALF} stiger med stigende møllestørrelse. Det bemærkes også, at L_{WALF} stiger kraftigere end L_{WA} , hvilket betyder, at den relative andel af lavfrekvent støj stiger med stigende møllestørrelse. Forskellen på regressionslinjernes hældning for alle data (tynde linjer) er statistisk signifikant. Da det kan hævdes, at de fire mindste møller måske ikke er repræsentative for moderne vindmøller, er der også beregnet regressionslinjer uden disse møller (tykke linjer). Hældningerne er lidt højere end med alle møller inkluderet, og forskellen er mindre, men stadig statistisk signifikant.

Det ses også af Figur 1, at der er nogen variation mellem møller af samme størrelse.

3.1.2 Lydeffektniveau i 1/3-oktavbånd

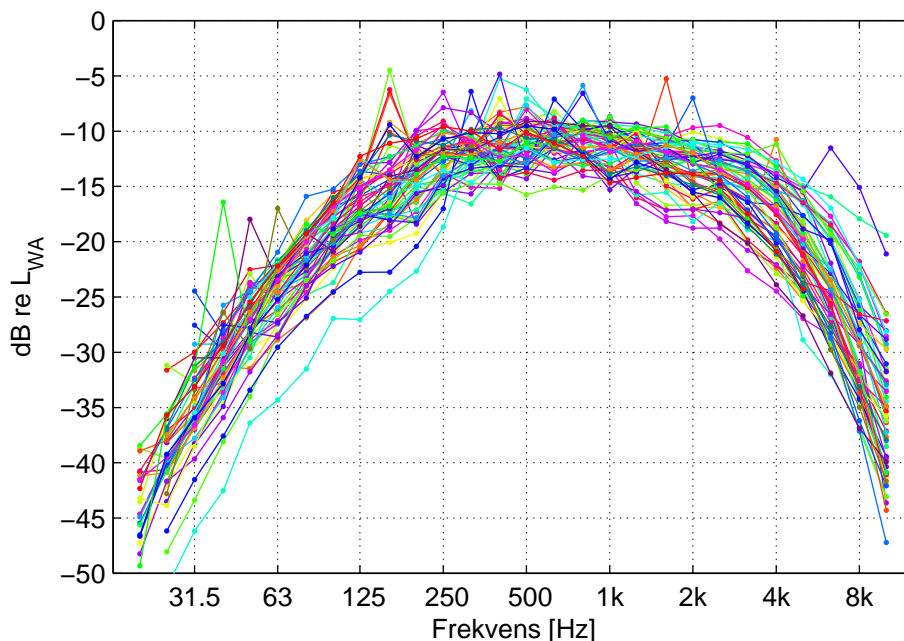
Lydeffektniveauer i 1/3-oktavbånd er vist i Figur 2.



Figur 2. A-vægtede lydeffektniveauer i 1/3-oktavbånd. 62 møller med nominel elektrisk effekt mellem 75 kW og 3,6 MW.

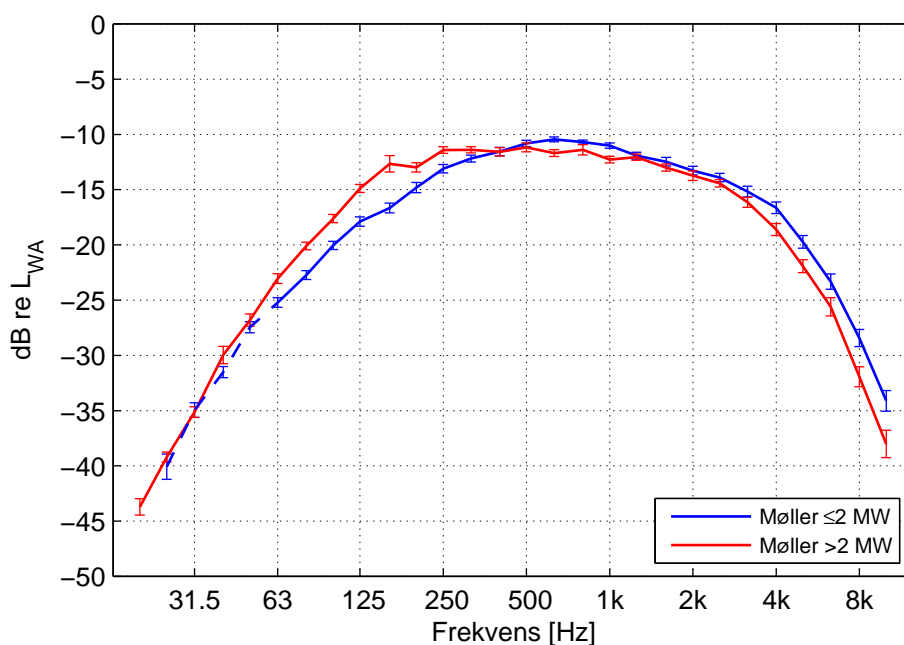
Vedrørende infralyddelen af spektret, er niveauerne så lave, at de selv tæt på møllen, f.eks. i en afstand af 150 m fra rotorens centrum, vil være langt under den normale høretærskel. Denne beregning tager ikke højde for eventuelle nærfeltsfænomener, f.eks. fra en vinge, der passerer tæt på.

Ved de frekvenser, hvor der er data for alle møller, varierer niveauet mellem møllerne med 20 dB eller mere. Dette er forventeligt, da møllerne omfatter et stort område af nominel elektrisk effekt. For tydeligere at vise mulige spektrale forskelle mellem møllerne er niveauerne i 1/3-oktavbånd normeret til den enkelte mølles samlede A-vægtede lydeffektniveau L_{WA} . Resultatet er vist i Figur 3.



Figur 3. Normerede A-vægtede lydeffektniveauer i 1/3-oktavbånd. 62 møller med nominel elektrisk effekt mellem 75 kW og 3,6 MW. (Normeret svarer til, at L_{WA} for den individuelle mølle er trukket fra alle niveauerne i 1/3-oktavbånd).

En eventuel forskel i spektret mellem små og store møller er undersøgt ved at opdele møllerne i to grupper: Møller op til og med 2 MW, og møller over 2 MW. Figur 4 viser middelværdi og standardafvigelse af middelværdi (standard error of mean, s.e.m.) for hver af de to grupper.

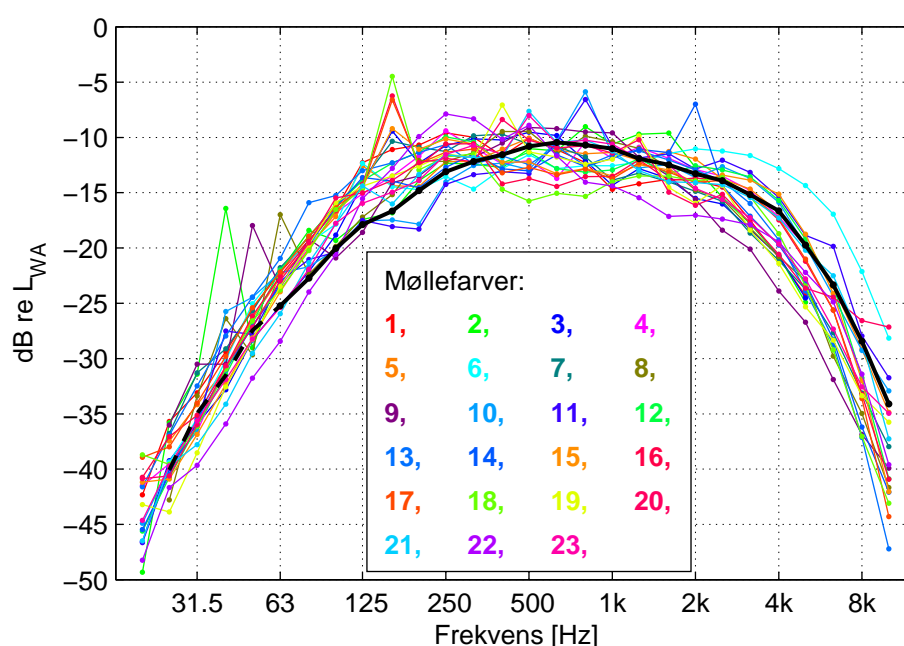


Figur 4. Normerede A-vægtede lydeffektniveauer i 1/3-oktavbånd. Middelværdier for to grupper af møller: ≤ 2 MW og > 2 MW. Lodrette streger angiver ± 1 standard error of mean (s.e.m.).

Spektret ligger tydeligt lavere i frekvens for de store møller end for de mindre møller. Forskellen i niveau er signifikant for 1/3-oktavniveauerne 63-250 Hz, 630 Hz, 1000 Hz, og 4-10 kHz

De signifikante forskelle mellem små og store møller er moderate, 2,2-4,0 dB ved 63-160 Hz, men systematiske, og selv små forskelle kan påvirke menneskers opfattelse af lyd ved lave frekvenser. Hertil kommer, at hvis lave frekvenser er afgørende for kravene til afstand til naboer, kan små forskelle have stor indflydelse på den nødvendige afstand.

Figur 5 viser middelværdien af de små møller op til og med 2 MW og de enkelte møller på over 2 MW.



Figur 5. Normerede A-vægtede lydeffektniveauer i 1/3-oktavniveauer. Middelværdi af 39 møller ≤ 2 MW (tyk sort linje) og 23 individuelle møller > 2 MW.

De store møller ligger over middelværdien af de små møller i næsten hvert eneste 1/3-oktavniveau under 315 Hz. Nogle af møllerne har en top i et eller flere 1/3-oktavniveauer, hvilket kan skyldes tonale komponenter. Toner kan stamme fra møllens mekaniske dele, f.eks. gearkassen eller hjælpeudstyr såsom generatorens kølesystem (se f.eks. Wagner et al. [10]).

3.2 Udendørs lydtrykniveau ved naboer

For hver af møllerne er beregnet den afstand, hvor det A-vægtede lydtrykniveau er faldet til 35 dB. Pedersen og Waye [11] har vist, at andelen af stærkt generede personer når op over 5 % omkring ved dette lydtrykniveau, og andelen af generede når over 10 % (Pedersen et al. [12]). Pedersen og Nielsen [13] har anbefalet en minimumsafstand fra vindmøller til naboer, så møllestøjen er under 33-38 dB. En grænse på 35 dB bruges ved vindmøller, f.eks. i Sverige for stille områder [14]. Det

er også den grænse, der gælder i Danmark i områder med åben og lav boligbebyggelse (nat) og i rekreative områder (aften, nat og weekend) for støj fra virksomheder [15] (men ikke for vindmøllestøj [9]). 35 dB synes derfor at være en ganske fornuftig grænse for vindmøllestøj.

Tabel 1 viser afstanden til de enkelte store møller samt forskellige nøgletal ved 35 dB grænsen.

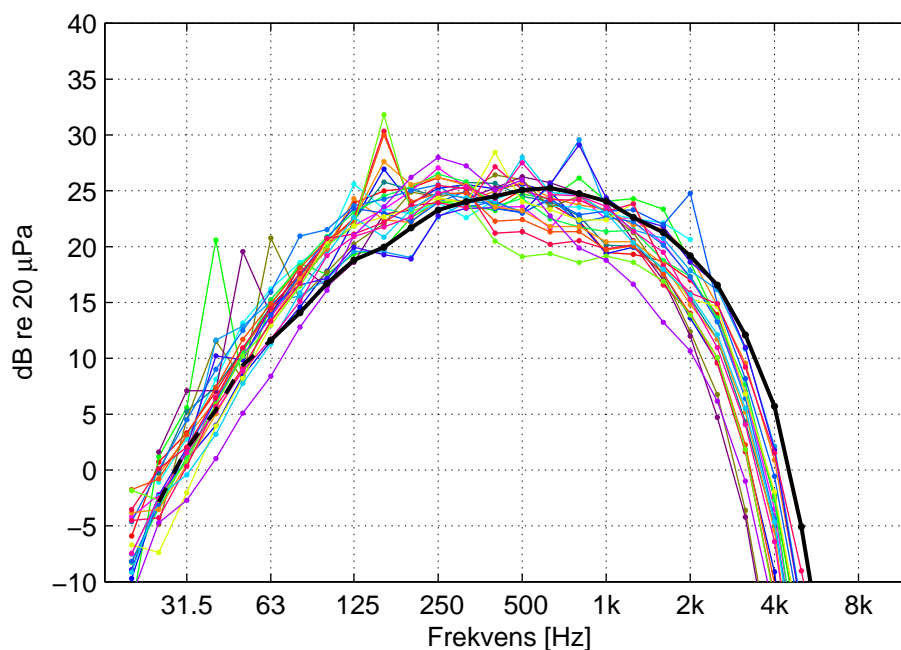
Mølle	Afstand	L_{pA}	L_{pALF}	$L_{pALF}-L_{pA}$	L_{pG}
	[m]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
1	629	35,0	28,8	-6,2	59,1
2	647	35,0	26,7	-8,3	54,5
3	879	35,0	28,9	-6,1	55,0
4	822	35,0	27,6	-7,4	58,0
5	679	35,0	28,0	-7,0	
6	751	35,0	29,2	-5,8	
7	713	35,0	28,8	-6,2	
8	1.227	35,0	27,0	-8,0	
9	1.144	35,0	27,0	-8,0	
10	676	35,0	25,3	-9,7	
11	715	35,0	25,2	-9,8	
12	847	35,0	28,6	-6,4	
13	768	35,0	29,2	-5,8	
14	631	35,0	28,0	-7,0	
15	962	35,0	29,8	-5,2	
16	1.078	35,0	31,7	-3,3	
17	1.042	35,0	31,5	-3,5	
18	1.038	35,0	32,7	-2,3	
19	594	35,0	27,2	-7,8	
20	495	35,0	26,9	-8,1	
21	861	35,0	26,5	-8,5	
22	1.054	35,0	26,3	-8,7	
23	834	35,0	26,2	-8,8	
Alle møller > 2 MW					
Gennemsnit		35,0	28,1	-6,9	
s.d.			2,0		
Møller ≤ 2 MW					
Gennemsnit		35,0	25,1	-9,9	
s.d.			1,6		

Tabel 1. Nøgletal ved den afstand fra hver enkelt mølle, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau er 35 dB. Afstanden er anført som skrå afstand til rotorcentrum, hvilket for de aktuelle møllehøjder er tæt på den vandrette afstand. Fire møller under 450 kW er ikke medregnet i tallene for de små møller.

Den mindste afstand, hvor en 35 dB grænse er overholdt, varierer betydeligt mellem de store møller, selvom møllerne er forholdsvis ens i størrelse (2,3-3,6 MW). Afstanden varierer fra mindre end 500 m til mere end 1200 m.

Den lavfrekvente del af støjen varierer indenfor et interval på omkring 7 dB for hver af møllegrupperne. Det ses endvidere, at der er omkring 3 dB mere lavfrekvent støj fra de store møller end fra de små, og at det ikke gør nogen forskel, om der ses på alle de store møller eller kun på de nye.

Spektrene for 1/3-oktavnåbånd ved disse afstande er vist i Figur 6.



Figur 6. A-vægtet lydtrykniveau i 1/3-oktavnåbånd ved den afstand fra hver enkelt mølle, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau er 35 dB (se Tabel 1). Farvekode for møller som i Figur 5.

På disse afstande, begynder luftens absorption at få betydning. Den påvirker især de høje frekvenser, og resultatet er, at flytningen af spektret i retning mod lavere frekvenser bliver mere udtalt end for lydeffektniveauet (sammenlign med Figur 5).

Det er vigtigt at bemærke, at for flere af møllerne findes det højeste niveau for 1/3-oktavnåbånd ved 250 Hz eller lavere, selv når der ses på de A-vægtede niveauer (Figur 6). Det er således hævet over enhver tvivl, at den lavfrekvente del af spektret spiller en vigtig rolle for støjen ved naboerne, og at lavfrekvent lyd skal tages alvorligt i vurderingen af støj fra store vindmøller.

I mange tilfælde tillades højere udendørs A-vægtede niveauer end 35 dB. Som et eksempel tillader de danske regler 44 dB for huse uden for boligområder og rekreative områder [9]. Af visuelle hensyn tillader de danske regler ikke boliger tættere på møller end fire gange den samlede møllehøjde [16], og på denne afstand er lydtrykniveauet ofte under 44 dB, hvis der er tale om en enkelt mølle. Der kan dog sagtens forekomme niveauer på 44 dB længere væk end fire gange møllehøjden, når der er flere møller sammen i vindmølleparker. Tabel 2 viser afstanden til små vindmølleparker, hvor det A-vægtede lydtrykniveau er 44 dB, såvel som forskellige nøgletal for denne afstand.

Mølle	Afstand	L_{pA}	L_{pALF}	$L_{pALF}-L_{pA}$	L_{pG}
	[m]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
1	530	44,0	37,9	-6,1	67,7
2	546	44,0	35,9	-8,1	61,1
3	831	44,0	38,1	-5,9	63,6
4	759	44,0	36,8	-7,2	66,9
5	585	44,0	37,2	-6,8	
6	672	44,0	38,4	-5,6	
7	631	44,0	38,0	-6,0	
8	1.241	44,0	36,3	-7,7	
9	1.142	44,0	36,3	-7,7	
10	579	44,0	34,5	-9,5	
11	624	44,0	34,5	-9,5	
12	791	44,0	37,8	-6,2	
13	695	44,0	38,4	-5,6	
14	528	44,0	37,2	-6,8	
15	934	44,0	39,0	-5,0	
16	1.078	44,0	40,8	-3,2	
17	1.033	44,0	40,6	-3,4	
18	1.033	44,0	41,8	-2,2	
19	487	44,0	36,4	-7,6	
20	375	44,0	36,0	-8,0	
21	805	44,0	35,8	-8,2	
22	1.045	44,0	35,5	-8,5	
23	771	44,0	35,4	-8,6	
Alle møller > 2 MW					
Gennemsnit		44,0	37,3	-6,7	
s.d.			1,9		
Møller ≤ 2 MW					
Gennemsnit		44,0	34,3	-9,7	
s.d.			1,6		

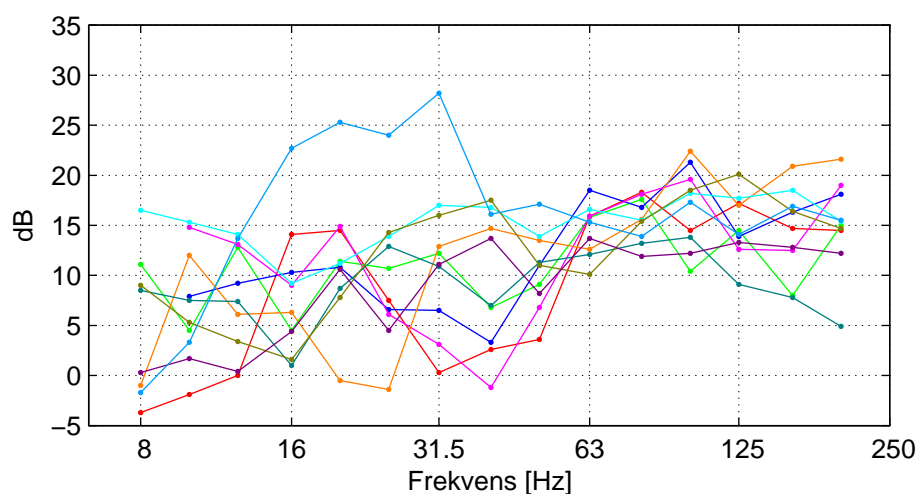
Tabel 2. Nøgletal ved den afstand, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau er 44 dB. Mølleparker med to rækker på hver 6 identiske møller, 300 m afstand mellem møller i begge retninger (200 m for små møller). Observationspunkt centreret ud for den lange side. Afstand angivet som skrå afstand til nærmeste mølle. Fire møller under 450 kW er ikke medregnet i tallene for de små møller.

Også her varierer den nødvendige afstand betragteligt mellem møllerne, og igen varierer den lavfrekvente del af støjen indenfor et interval på omkring 7 dB for hver af møllegrupperne. Også her er der omkring 3 dB mere lavfrekvent støj fra de store møller end fra de små, og heller ikke her gør det nogen forskel, om der ses på alle de store møller eller kun på de nye

3.3 Lydisolation

Under målingerne var der alvorlige problemer med baggrundsstøj ved de tre laveste frekvenser. 18 målinger med et signal/støj-forhold på under 1,3 dB blev kasseret. Syv rum/frekvens-kombinationer måtte derfor beregnes ud fra målinger i kun to

eller tre 3D-hjørner. To rum/frekvens-kombinationer, hvor der kun var målinger fra et enkelt 3D-hjørne blev ikke beregnet. Figur 7 viser lydisolationen for de ti rum.



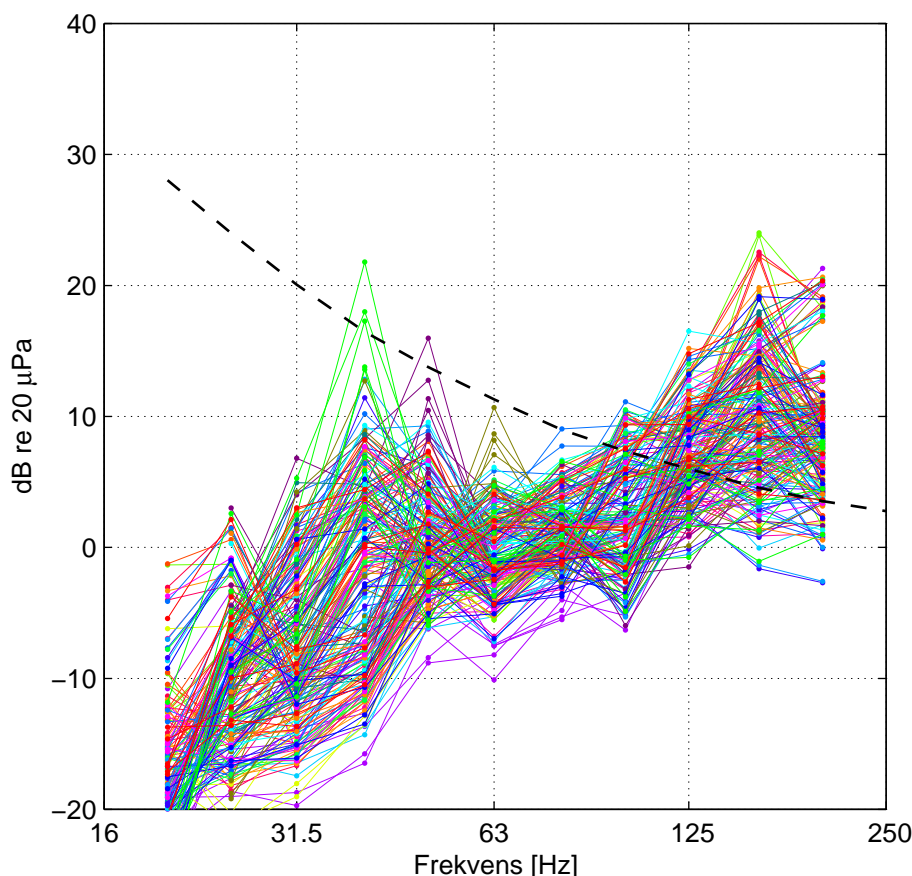
Figur 7. Lydisolation målt for 10 rum.

Ved frekvenserne 63-200 Hz, har rummene med få undtagelser en lydisolation på 10-20 dB. Mod lavere frekvenser falder isolationen, og forskellen mellem rummene bliver større. Nogle rum viser en meget lille eller endog negativ isolation ved visse frekvenser. Et enkelt rum har usædvanlig høj isolation i området 16-31,5 Hz. Dette var et lille værelse, der anvendes til opbevaring af møbler og andet. Rummet kan således ikke betragtes som et typisk opholdsrum, og dets data benyttes ikke i de videre beregninger.

Vær opmærksom på, at for hvert 1/3-oktavbånd refererer det indendørs niveau til det maksimale niveau, som man normalt vil blive udsat for i rummet (afsnit 2.4). Isolationstallene er derfor, især for den øverste del af frekvensområdet, lavere end traditionelle isolationstal beregnet til tekniske formål, hvor man typisk anvender det gennemsnitlige niveau i rummet.

3.4 Indendørs lydtrykniveau ved naboer

Figur 8 viser indendørs lydtrykniveauer for 1/3-oktavbånd for alle 207 kombinationer af 23 store møller og 9 rum i afstanden med et samlet A-vægtet udendørs lydtrykniveau på 35 dB. Vær opmærksom på, at de indendørs niveauer estimerer det maksimale niveau, som man normalt vil blive udsat for i rummet og ikke det gennemsnitlige niveau i rummet (se afsnit 2.4).

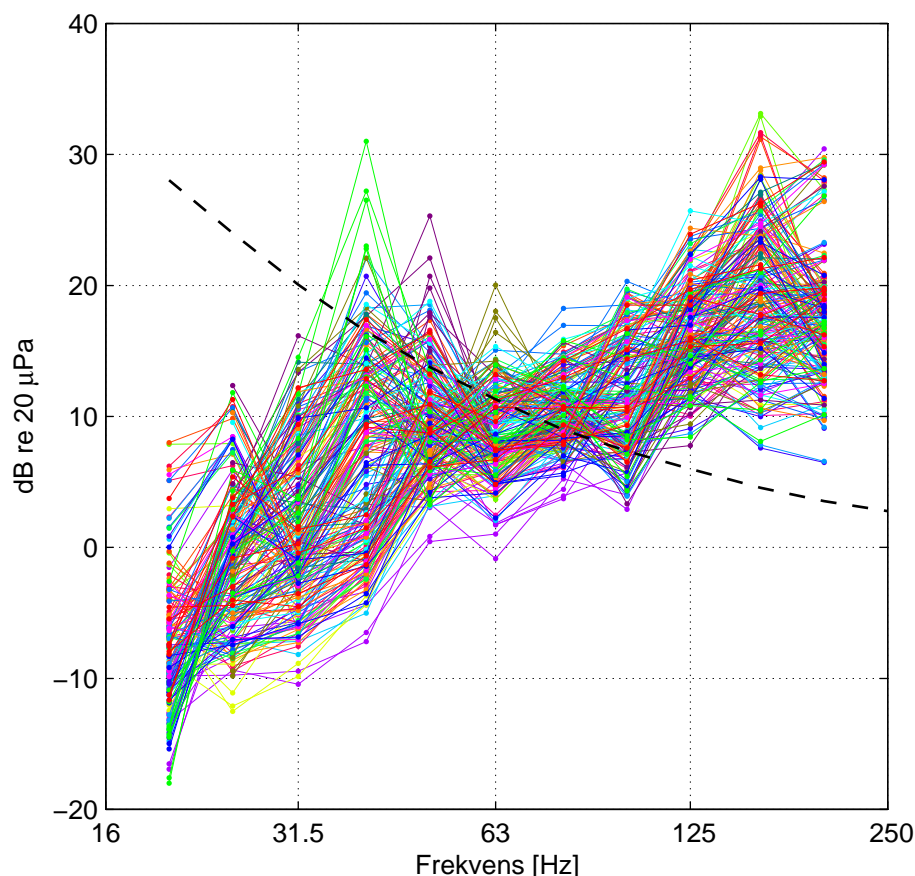


Figur 8. Indendørs A-vægtede lydtrykniveauer for 1/3-oktavbånd i den afstand fra hver enkelt mølle, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau udendørs er 35 dB (se Tabel 1). 207 kombinationer af 23 store møller og 9 rum. Den stiplede linje er høretærsklen i henhold til ISO 389-7. Farverne angiver møllen, farvekode som i Figur 5.

Der ses store forskelle mellem mølle/rum kombinationerne. Det meste af variationen skyldes forskelle i rummenes lydisolation, undtagen ved 63 og 80 Hz, hvor både rum og mølle bidrager nogenlunde lige meget til variationen. Høje værdier ved 40 Hz skyldes det høje lydeffektniveau for en enkelt mølle, mens høje værdier ved 200 Hz skyldes lav lydisolation af et enkelt rum.

Det ses af den indsatte høretærskel (stiplet linje), at den lavfrekvente lyd kan høres i mange mølle/rum-kombinationer, især ved de højeste af de lave frekvenser. Lyden vil ikke være ret kraftig, men som nævnt i indledningen, kan lavfrekvent lyd være generende, selvom den ikke er ret langt over høretærsklen, og nogle personer kan være generet af lydene i Figur 8.

Figur 9 viser indendørsniveauer for situationen fra Tabel 2, hvor det udendørs A-vægtede lydtrykniveau fra en møllepark er 44 dB.



Figur 9. Indendørs A-vægtede lydtrykniveauer for 1/3-oktavbånd i den afstand fra en møllepark, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau udendørs er 44 dB (se Tabel 2). 207 kombinationer af 23 store møller og 9 rum. Stiplet linje er høretærsklen i henhold til ISO 389-7. Farverne angiver møllen, farvekode som i Figur 5.

Her vil der være hørbar lyd nogle steder i alle rum og for alle møller. I mere end halvdelen af tilfældene (122 ud af 207), overskrides den normale høretærskel med mere end 15 dB i et eller flere 1/3-oktavbånd, og der er risiko for, at en betydelig del af beboerne vil være generet af lyden.

Med henblik på at undgå søvnforstyrrelser anbefaler WHO for kontinuert støj en indendørs grænse på 30 dB for det A-vægtede lydtrykniveau [17], men bemærker også, at hvis støjen indeholder en stor andel af lavfrekvent støj, ”*anbefales en endnu lavere grænse, fordi lavfrekvent støj kan forstyrre hvile og søvn selv ved lave lydtryk*”. Hvor meget lavere er ikke angivet, men medmindre niveauet over 200 Hz er usædvanlig lavt, vil det samlede A-vægtede lydtrykniveau tydeligvis overstige f.eks. 25 dB i mange af tilfældene i Figur 9.

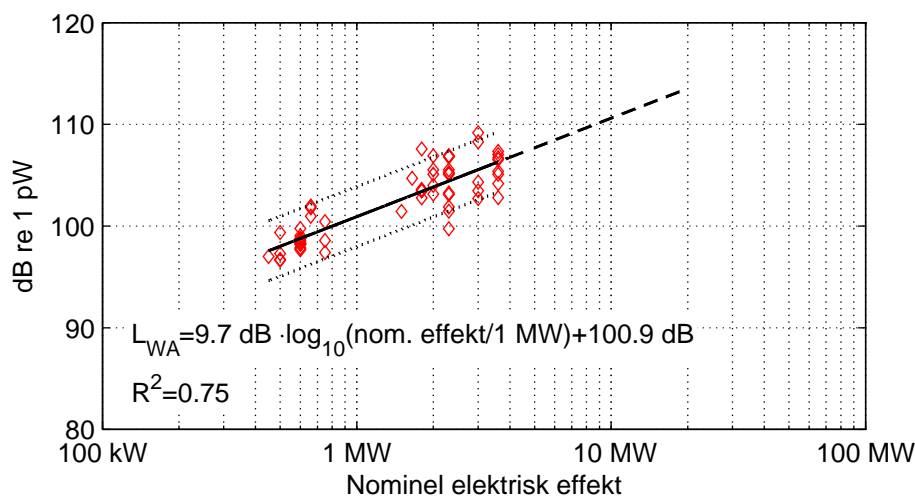
3.4.1 Den danske indendørsgrænse

I 100 af de 207 mølle/rum kombinationer i Figur 9 overstiger et A-vægtet niveau den danske nattegrænse på 20 dB for mindst ét 1/3-oktavbånd i 10-160 Hz området, og det er rimeligt at regne med, at det samlede lydtrykniveau for dette frekvensområde, L_{pALF} , vil overstige 20 dB for endnu flere mølle/rum kombinationer.

Det bør nævnes, at vindmøller har været undtaget fra de generelle danske retningslinjer for lavfrekvent støj siden 2006, da bekendtgørelsen om støj fra vindmøller blev opdateret [9]. Argumentet var, at det indendørs L_{pALF} ikke vil overstige 20 dB, hvis de normale udendørs grænseværdier overholdes [18]. Som det ses, kommer det indendørs niveau ofte over 20 dB for store møller.

3.5 Støj som funktion af møllestørrelse

Datamaterialet giver et nyttigt overblik over, hvilken lydeffekt der udsendes fra vindmøller af forskellig størrelse, og med forsigtighed kan resultaterne benyttes til at anslå lydeffektniveauet for fremtidens større møller. Figur 10 gentager data for L_{WA} fra Figur 1, nu med en ekstrapolering mod højere nominel elektrisk effekt samt data for den indsatte regressionslinje.



Figur 10. Lydeffektniveau (L_{WA}) som funktion af møllestørrelse. Vindhastighed 8 m/s, fire møller under 450 kW ikke medtaget. Lineær regressionslinje, standard error of estimates (s.e.e.) 1,79 dB. Ekstrapolation (stiplet linje), 90 % konfidensintervaller baseret på s.e.e. (prikket linje).

3.6 Atmosfæriske forhold

Alle de foregående beregninger antager sfærisk lydudbredelse, dvs. en 6 dB reduktion af lydtrykniveauet per fordobling af afstanden. Under visse atmosfæriske betingelser, f.eks. med temperaturinversion eller 'low-level jets', kan der være et lydreflekterende lag i en vis højde, og dermed ligner lydudbredelsen ud over en vis afstand mere cylindrisk udbredelse, som kun giver 3 dB reduktion per fordobling af afstanden. Over vand regner de svenske retningslinjer generelt med cylindrisk udbredelse ud over en afstand på 200 m, en afstand som stemmer fint med data fra Bolin et al. [19], som viste refleksion i en højde i størrelsesordenen 100-200 m.

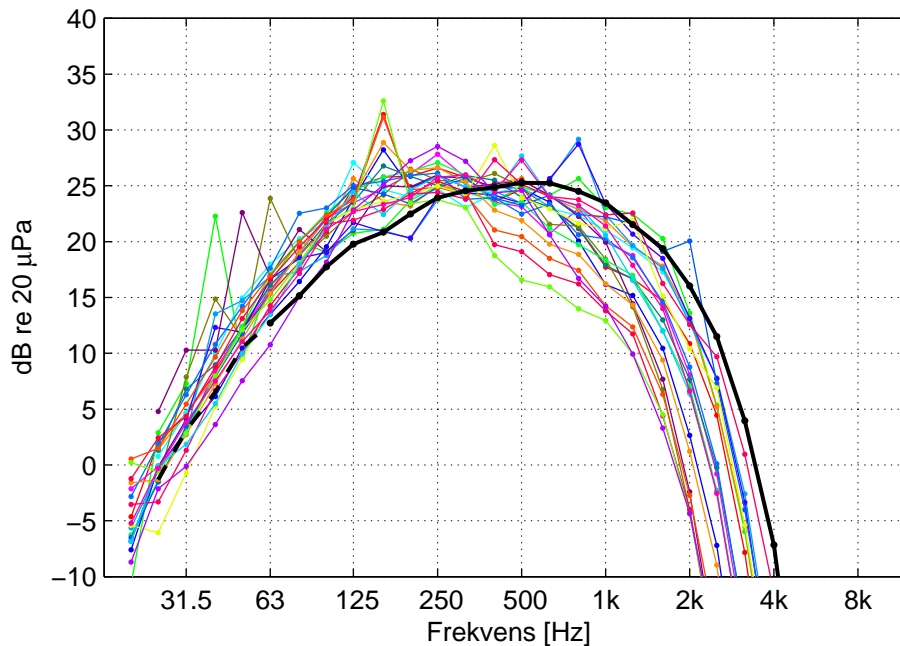
Med cylindrisk udbredelse fra 200 m gælder følgende ligning (for afstande over 200 m):

$$L_p = L_{WA} - 20 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{200 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right) - 10 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{200 \text{ m}} \right) - 11 \text{ dB} - \alpha \cdot d + 1,5 \text{ dB} \quad (4)$$

Tabel 3 og Figur 11 viser henholdsvis nøgletal og lydtrykniveauer i 1/3-oktavbånd i den afstand, hvor det A-vægtede lydtrykniveau er faldet til 35 dB under forudsætning af cylindrisk udbredelse fra 200 m.

Mølle	Afstand	L_{pA}	L_{pALF}	$L_{pALF} - L_{pA}$	L_{pG}
	[m]	[dB]	[dB]	[dB]	[dB]
1	1.476	35,0	29,7	-5,3	60,4
2	1.414	35,0	28,2	-6,8	56,2
3	2.373	35,0	30,3	-4,7	57,1
4	2.100	35,0	29,2	-5,8	60,0
5	1.562	35,0	29,4	-5,6	
6	1.828	35,0	30,7	-4,3	
7	1.777	35,0	30,0	-5,0	
8	3.482	35,0	29,7	-5,3	
9	3.152	35,0	29,6	-5,4	
10	1.481	35,0	26,9	-8,1	
11	1.579	35,0	27,0	-8,0	
12	2.257	35,0	30,1	-4,9	
13	1.947	35,0	30,6	-4,4	
14	1.360	35,0	29,4	-5,6	
15	2.769	35,0	31,2	-3,8	
16	3.405	35,0	32,9	-2,1	
17	3.209	35,0	32,8	-2,2	
18	3.357	35,0	33,6	-1,4	
19	1.306	35,0	28,3	-6,7	
20	981	35,0	27,7	-7,3	
21	2.185	35,0	28,4	-6,6	
22	3.063	35,0	28,0	-7,0	
23	2.074	35,0	28,0	-7,0	
Alle møller > 2 MW					
Gennemsnit		35,0	29,6	-5,4	
s.d.			1,8		
Møller ≤ 2 MW					
Gennemsnit		35,0	26,2	-8,8	
s.d.			1,7		

Tabel 3. Nøgletal ved den afstand, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau er 35 dB. Cylindrisk udbredelse er antaget fra 200 m. Afstanden er angivet som skrå afstand til rotorcenter, hvilket for de aktuelle møllehøjder er tæt på den vandrette afstand. Fire møller under 450 kW er ikke medregnet i tallene for de små møller.



Figur 11. A-vægtet lydtrykniveau i 1/3-oktavbånd ved den afstand, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau er 35 dB (se Tabel 3). Cylindrisk lydudbredelse er antaget fra 200 m. Farvekode for møller som i Figur 5.

Det er nødvendigt med meget større afstande (981-3482 m) for at nå ned på 35 dB end med ren sfærisk udbredelse, og den lavfrekvente karakter af spektret er blevet endnu mere udtalt (sammenlign med Tabel 1 og Figur 6). Cylindrisk udbredelse kan forklare tilfælde, hvor rumlen af vindmøller hævdes at være hørbar kilometre væk. Et worst-case scenarie, der kombinerer temperaturinversion med en vindmøllepark, der opfører sig som en linjekilde i et vist afstandsområde, kan teoretisk set reducere den geometriske dæmpning i dette område til nul. Det er imidlertid nødvendigt med mere viden om de atmosfæriske forhold og forekomsten af forskellige fænomener.

4 KONKLUSIONER

Resultaterne bekræfter den hypotese, at spektret af vindmøllestøj flytter sig nedad i frekvens med stigende møllestørrelse. Den lavfrekvente relative andel af den udsendte støj er højere for store vindmøller (2,3-3,6 MW) end for små vindmøller (≤ 2 MW). Forskellen er statistisk signifikant for 1/3-oktavbåndene i frekvensområdet 63-250 Hz. Forskellen kan også udtrykkes som en forskydning af spektret på omkring 1/3 oktav. Et yderligere skift af lignende størrelse må forventes for vindmøller i 10 MW størrelsen.

Når man ser på lydtrykniveauet udendørs i relevante naboafstande, bliver det lavfrekvente indhold endnu mere udtalt. Det skyldes, at luftens absorption reducerer de høje frekvenser meget mere end de lave. Selv når der ses på A-vægtede niveauer, udgør lave frekvenser en væsentlig del af støjen, og for mange af de undersøgte store vindmøller ligger det 1/3-oktavbånd, som har det højeste lydtrykniveau, på eller under 250 Hz. Det er således hævet over enhver tvivl, at den lavfrekvente del af spektret spiller en vigtig rolle i støjen ved naboerne.

Den indendørs lavfrekvente støj i naboafstand varierer med vindmølle, lydisolation af rummet og position i rummet. Hvis støjen fra de undersøgte store vindmøller har et udendørs A-vægtet lydtrykniveau på 44 dB, det maksimale i den danske regulering af støj fra vindmøller, er der risiko for, at en betragtelig del af beboerne vil være generet af lavfrekvent støj, selv indendørs. Den danske aften/nat-grænse på 20 dB for A-vægtet støj i frekvensområdet 10-160 Hz, som gælder for støj fra virksomheder (men ikke for vindmøllestøj), vil blive overskredet i opholdsrummene hos mange af de naboer, der ligger tæt ved grænsen på de 44 dB. Problemerne reduceres betydeligt med en udendørs grænse på 35 dB.

Vindmøllerne udsender ganske vist infralyd (lyd under 20 Hz), men niveauerne er lave, når man tager menneskets følsomhed overfor disse frekvenser i betragtning. Selv tæt på møllerne er lydtrykniveauet langt under den normale høretærskel, og infralyd betragtes således ikke som et problem for møller af samme konstruktion og størrelse som de undersøgte møller.

Den lavfrekvente støj fra flere af de undersøgte store møller indeholder toner, formodentlig fra gearkassen, som resulterer i toppe i de tilsvarende 1/3-oktavbånd. Tonetillægget hjælper ikke til at sikre, at tonerne bliver fjernet eller reduceret, da tonerne ikke er tilstrækkeligt udtalte, til at de overhovedet udløser et tonetillæg. Den spektrale forskel mellem store og små vindmøller er i øvrigt fortsat statistisk signifikant, selvom toppene i 1/3-oktavbåndene fjernes.

Ovenstående konklusioner er baseret på data for møller i området 2,3-3,6 MW nominel elektrisk effekt. Problemerne med lavfrekvent støj må forventes at blive større med endnu større møller.

Den udsendte A-vægtede lydeffekt stiger proportionalt med den nominelle elektriske effekt. Derfor forurener store vindmøller det samme areal med støj som små møller med den samme samlede elektriske effekt.

Der er forskelle på flere decibel mellem støjen fra forskellige møller af samme størrelse, selv for møller af samme fabrikat og model. Det er derfor ikke relevant at foretage beregninger ned til brøkdele af en decibel og tro på, at dette holder for de aktuelle møller, som bliver stillet op. Der må indregnes en vis sikkerhedsmargin i planlægningsfasen for at sikre, at de faktisk rejste vindmøller vil overholde støjgrænserne. Der findes en international teknisk specifikation til dette, men den anvendes ofte ikke.

Under visse atmosfæriske betingelser, f.eks. temperaturinversion, kan støjen være mere generende og – og især den lavfrekvente del – udbrede sig meget længere end normalt antaget. Det er nødvendigt med mere viden om sådanne fænomener og deres forekomst.

Referencer

- [1] B. Søndergaard, C. Ryom, "Low frequency noise from large wind turbines – Sound power measurement method", Report AV 135/08, Delta, April 2008.
- [2] B. Søndergaard, K. D. Madsen, "Low frequency noise from large wind turbines – Results from sound power measurements", Report AV 136/08, Delta, revised version December 2008.
- [3] B. Søndergaard, K. D. Madsen, "Low frequency noise from large wind turbines – Results from previous sound power measurements", Report AV 137/08, Delta, May 2008.
- [4] D. Hoffmeyer, B. Søndergaard, "Low frequency noise from large wind turbines – Measurements of sound insulation of facades", Report AV 1097/08, Delta, April 2008.
- [5] K. D. Madsen and T. H. Pedersen, "Low frequency noise from large wind turbines – Final report", Report AV 1272/10, Delta, November 2010.
- [6] IEC 61400-11, "Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques", Second edition 2002 plus Amendment 1 2006, International Technical Commission, Geneva.
- [7] ISO 9613-2, "Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation", International Organization for Standardization, Geneva, 1996.
- [8] ISO 9613-1, "Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere", International Organization for Standardization, Geneva, 1993.
- [9] "Bekendtgørelse om støj fra vindmøller", Bekendtgørelse nr. 1518 af 14. december 2006, Miljøministeriet, København.
- [10] S. Wagner, R. Bareiß, G. Guidati, "Wind turbine noise", Springer Berlin, ISBN 3-540-60592-4, 1996.
- [11] E. Pedersen, K. P. Waye, "Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship", J. Acoust. Soc. Am., 116 (6), 3460-3470, 2004.
- [12] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, J. Bouma, "Response to noise from modern wind farms in The Netherlands", J. Acoust. Soc. Am., 126 (2), 634-643, 2009.
- [13] T. H. Pedersen, K. S. Nielsen, "Genevirkning af støj fra vindmøller", Rapport 150, Delta Akustik & Vibration, 1996.
- [14] "Buller från vindkraft – Riktvärden för ljud från vindkraft" (Noise from wind turbines – Recommended limits for sound from wind turbines), Naturvårdsverket, Stockholm, 2009.
- [15] "Ekstern støj fra virksomheder", Vejledning nr. 5, Miljøstyrelsen, 1984.
- [16] "Vejledning om planlægning for og landzonetilladelse til opstilling af vindmøller", Vejledning nr. 9296, Miljøministeriet, 22. maj 2009.
- [17] "Guidelines for community noise", B. Berglund, T. Lindvall, D. H. Schwela (editors), World Health Organization, Geneva, 1999.
- [18] "Høring af udkast til bekendtgørelse om støj fra vindmøller", Miljøstyrelsen, 30. oktober 2006.
- [19] K. Bolin, M. Boué, I. Karasalo, "Long range sound propagation over a sea surface", J. Acoust. Soc. Am. **126** (5), 2191-2197, November 2009.